

ANALISIS PENGARUH RASIO DIAMETER SEBAGAI PARAMETER KINERJA AERODINAMIKA *DUAL ROTOR COUNTER-ROTATING WIND TURBINE*

Setiadi Wira Buana^{1*}, Verdy A Koehuan², A. Riszal¹, Samsul Kamal³, Sugiyono³

^{1,4}Program Pascasarjana S2 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

²Program Pascasarjana S2 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

³Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada,

Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM, Yogyakarta 55281

*E-mail : setiadiwirabuana@gmail.com

ABSTRAK

Penggunaan energi alternatif yang ramah lingkungan (*Green Energy*) merupakan topik utama yang mulai banyak dibahas dewasa ini. Salah satu sumber energi terbarukan yaitu energi angin (turbin angin). Seiring dengan perkembangan teknologi, maka dikembangkan *Counter Rotating Wind Turbine* (CRWT). CRWT merupakan turbin angin dengan poros horisontal terdiri dari dua buah rotor yang putaran rotor saling berlawanan arah. Efisiensi konversi energi turbin angin *dual rotor* ini secara teoritis lebih baik dari pada rotor tunggal. Pada penelitian ini difokuskan pada CRWT dengan tipe propeler tiga *blade* menggunakan *airfoil* S826. Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis melalui desain dan analisis rotor turbin (kajian rotor turbin) yang terdapat pada CRWT terutama pengaruh rasio diameter (D) antara rotor depan (D_1) dan rotor belakang terhadap performa dari CRWT, dengan permodelan menggunakan program *GAMBIT* dan *solver* simulasi menggunakan program *FLUENT CFD ANSYS*. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa variasi yang dilakukan pada rasio diameter rotor memberikan pengaruh terhadap *performance* aerodinamika dari CRWT. Penggunaan rasio diameter $D_1/D_2 = 1$ menghasilkan torsi yang terbaik, sehingga daya dan efisiensi turbin juga semakin baik atau meningkat.

Kata kunci: diameter rotor, dual rotor counter-rotating wind turbine, performance wind turbine

ABSTRACT

The use of environmentally friendly alternative energy (*Green Energy*) is the main topic that started much discussed today. One source of renewable energy, namely wind energy (wind turbines). Along with the development of technology, it is developed and become the *Counter Rotating Wind Turbine* (CRWT). CRWT is a wind turbine with horizontal shaft which consists of two rotors that have rotor rotation in opposite directions. The energy conversion efficiency of dual rotor wind turbine is theoretically better than the single rotor. This research is focused on CRWT with three blade propeller type using *airfoil* S826. The purpose of this research is to analyze through the design and analysis of turbine rotors (the study of turbine rotors) contained in CRWT namely the influence of the ratio of the diameter (D) between the front rotors (D_1) and the rear by modeling using *GAMBIT* program and *solver FLUENT CFD simulation* using *ANSYS* program. The results of this study indicate that the variation is done on a rotor diameter ratio influence on the aerodynamic performance of CRWT. The use of the ratio of the diameter $D_1/D_2 = 1$ produces best torque, so that the power and efficiency of the turbine is also getting better or increased.

Keyword: diameter rotor, dual rotor counter-rotating wind turbine, performance wind turbine

PENDAHULUAN

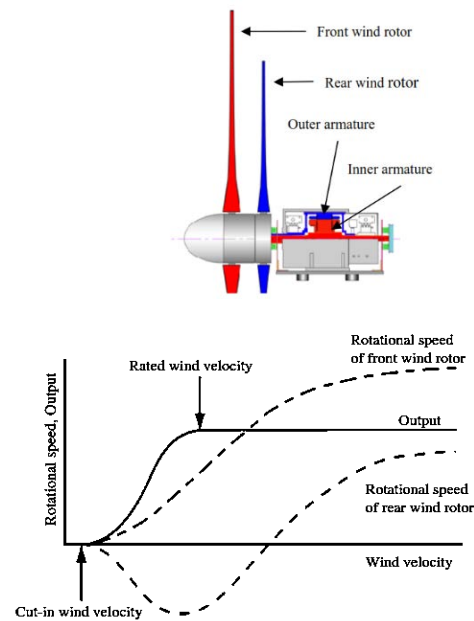
Turbin angin yang juga dikenal dengan sebutan kincir angin merupakan sarana

pengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik untuk memutar generator listrik.

Energi kinetik angin dapat diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin. Berdasarkan kedudukan poros jenis-jenis turbin angin itu dibagi dalam dua kategori, yaitu turbin angin dengan sumbu horisontal dan turbin angin dengan sumbu vertikal.

CRWT (*Counter-rotating Wind Turbine*) terdiri dari dua buah rotor yang mempunyai diameter berbeda dengan menggerakkan satu buah alternator yang putaran rotor saling berlawanan arah. Efisiensi konversi energi turbin angin *double rotor* ini secara teoritis lebih baik dari pada rotor tunggal. Berdasarkan teori momentum (*Betz limit*), koefisien daya maksimum untuk rotor tunggal adalah $16/27$ (59.3 %) dengan rasio kecepatan angin aksial adalah $1/3$ dari kecepatan angin masuk. Sedangkan menurut Newman, (1983) koefisien daya maksimum turbin angin rotor ganda (*double rotor*) secara ideal melalui teori aktuatur disk adalah $16/25$ (64%), dengan asumsi rasio kecepatan aksial pada rotor pertama adalah 0,2 dan rotor kedua 0,6.

Chantharasenawong, dkk. (2008), juga mengungkapkan berdasarkan teori momentum aksial, turbin angin rotor ganda secara ideal mampu mengkonversi energi angin hingga 68.1 % dengan koreksi asumsi rasio kecepatan aksial pada rotor kedua 0,62. Kajian secara numerik maupun eksperimen telah berhasil dilakukan oleh beberapa peneliti dan juga membuktikan bahwa efisiensi turbin angin rotor ganda lebih baik dari pada rotor tunggal. Rotor berukuran besar ditempatkan di depan, sedangkan yang berukuran kecil di belakangnya atau sebaliknya. Kecepatan rotasi dari kedua rotor sama dan saling *support* untuk menggerakkan alternator (Kanemoto, 2006). Peningkatan kecepatan angin membuat kecepatan rotasi kedua rotor meningkat dan kecepatan rotasi dari rotor belakang menjadi lebih cepat dibandingkan dengan rotor depan karena ukurannya yang kecil (Gambar 1). Bagian belakang rotor akan mencapai kecepatan rotasi maksimum pada kondisi kecepatan angin rancangan sehingga dengan meningkatnya kecepatan angin rotor belakang berkurang kecepatannya secara bertahap dan mulai berputar pada arah yang sama dari rotor depan sehingga bertepatan dengan torsi yang lebih besar diterima oleh alternator (Koichi Kubo, dkk. 2008).



Gambar 1. Turbin angin rotor ganda (*counter rotating*)

Pengembangan CRWT telah banyak dilakukan baik melalui pemodelan secara numerik maupun eksperimen terhadap parameter aerodinamika rotor turbin untuk mengoptimalkan daya angin suatu sistem pembangkit (Ushiyama, dkk. 1996) melakukan pengujian pada turbin angin rotor ganda dengan prinsip kontra rotating dan co-aksial, serta melalui variasi jumlah *blade* dengan rasio diameter rotor D_1/D_2 adalah 0,5, melaporkan adanya peningkatan koefisien daya turbin dengan torsi awal yang rendah pada turbin kontra rotating. Penelitian ini menunjukkan bahwa turbin angin kontra rotating lebih efisien dari co-aksial dan secara teknis dapat digunakan sebagai penggerak alternator untuk pembangkit listrik karena putaran relatifnya cukup tinggi. Menurut Jung, dkk. (2005) melaporkan hasil penelitiannya secara eksperimen dan analisis numerik (*quasi-steady strip*) melalui prototipe turbin angin 30 kW rotor ganda kontra rotating dengan variasi rasio diameter dan jarak rotor (x/D_1), menunjukkan peningkatan daya output 21 % dari rotor tunggal (C_p , maks 0,5) pada rasio diameter 0.5 dan rasio jarak 0.5.

Shen dkk. (2007), menggunakan simulasi CFD dengan EllipSys3D untuk memprediksi performansi CRWT melalui variasi rasio jarak rotor dengan diameter rotor yang sama menghasilkan produksi energi sebesar 43.5% dan koefisien daya 0,54 pada rasio jarak rotor

0.25. Herzog, dkk. (2010) melakukan studi eksperimen dan simulasi CFD pada turbin kontra rotating dengan diameter rotor sama, dan rasio jarak rotor 0.4 menunjukkan peningkatan daya yang diekstrak 9% lebih tinggi dari rotor tunggal.

Studi tentang turbin angin sumbu horisontal tipe propeler tiga *blade* rotor ganda kontra rotasi (*double rotor counter-rotation*) yang disajikan di atas belum memperlihatkan hasil yang maksimal terutama pada parameter aerodinamika rotor turbin. Parameter-parameter tersebut belum dipelajari secara komprehensif dan simultan, dimana masih dilakukan secara terpisah, diantaranya pengaruh *solidity*, sudut *pitch*, rasio kecepatan aksial, rasio diameter, dan rasio jarak pada rotor pertama dan rotor kedua terhadap koefisien daya turbin. Oleh karena itu, investigasi perlu dilakukan untuk rentang parameter-parameter tersebut sehingga dapat menampilkan karakteristik turbin yang lebih representatif.

Rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi rasio diameter antara rotor depan dengan rotor belakang terhadap performa turbin angin dual rotor *contra rotating* melalui kajian secara komprehensif dari karakteristik aerodinamika rotor turbin.

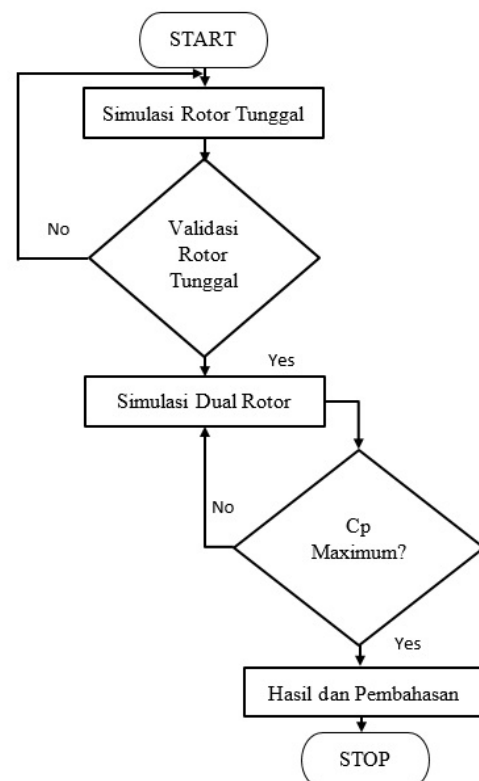
Peneliti hanya mengkaji performa rotor turbin angin dual rotor contra rotating dan fenomena aliran (karakteristik aerodinamika rotor) melalui variasi rasio diameter dengan rasio jarak konstan. Model blade yang digunakan dalam penelitian ini adalah model blade rotor tunggal dengan ukuran diameter rotor 0,944 m, yang telah dikembangkan oleh NORCOWE (*Norwegian Centre for Offshore Wind Energy*) dan *Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology NTNU, Trondheim, Norway*. Rotor blade turbin yang dikembangkan tersebut menggunakan seri airfoil S826 yang dikeluarkan oleh NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), (Krogstad dkk. 2013). Kondisi operasi turbin pada selang kecepatan angin 3 m/s hingga 10 m/s. Rasio jarak (X/D_1) adalah 0.236 m dengan variasi rasio diameter rotor depan dan rotor belakang (D_1/D_2) 0.5 hingga 2.00 pada *solidity* konstan baik rotor depan maupun rotor belakang. sementara TSR (tip speed ratio) rotor pertama sama dengan TSR rotor kedua.

Analisis tiga dimensi blade rotor turbin dual rotor counter rotating terkait dengan parameter-parameter aerodinamika rotor dan performa turbin dual rotor menggunakan simulasi CFD (Fluent).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian secara numerik parameter aerodinamika turbin angin dual rotor counter rotating atau CRWT untuk dapat memaksimalkan daya output atau daya terkonversi dari aliran udara bebas. Kajian aerodinamika dilakukan terhadap rotor turbin angin poros horisontal tipe propeler tiga blade dual rotor counter rotating menggunakan airfoil S826 dengan variasi rasio diameter pada rasio jarak konstan.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode numerik. Model numerik dibuat sesuai dengan kondisi lapangan atau kondisi sebenarnya. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



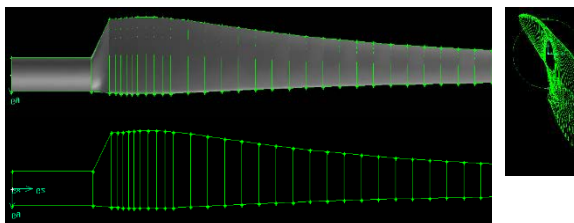
Gambar 2. Diagram Alir penelitian

Model *blade* untuk penelitian ini adalah model *blade* untuk rotor tunggal dengan airfoil seri S826 yang dikeluarkan oleh NREL (Krogstad dkk. 2013), jari-jari rotor 0,944 m.

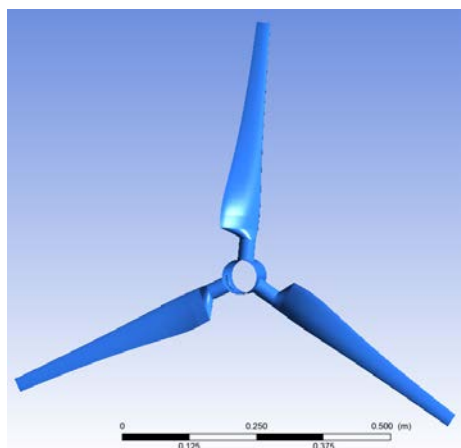
Model *blade* rotor tunggal ini akan digunakan sebagai sampel uji karakteristik aerodinamika agar hasilnya dapat dibandingkan dengan rotor ganda kontra rotasi.

Metode numerik yang digunakan yaitu berbasis *computational fluid dynamic* (CFD), di mana airfoil yang digunakan didesain menjadi sebuah blade yang digunakan menjadi acuan rotor tunggal. Kemudian hasil dari desain tersebut disimulasikan dan hasilnya akan divalidasi dengan hasil eksperimen *Blint Test 4* (BT4) dilaporkan oleh Bartl dan Sætran (2016), dari hasil eksperimennya menunjukkan $C_{P, \max} = 0,468$ pada TSR = 6 dengan kecepatan angin 11.5 m/s (putaran rotor 1395 rpm). Dimana BT4 juga menggunakan airfoil dan geometri yang sama dan menjadi acuan dalam penelitian ini.

Tahapan pelaksanaan pertama adalah simulasi rotor tunggal, dalam tahap ini mencangkup desain rotor tunggal, desain domain komputasi dan simulasi rotor tunggal. Mendesain rotor tunggal dengan desain airfoil yang digunakan yaitu dengan airfoil seri S826 yang dikeluarkan oleh NREL (Krogstad dkk. 2013), jari-jari rotor 0,944 m. Gambar 3, menunjukkan airfoil dari *blade* dan untuk geometri *blade* rotor tunggal ditunjukkan pada gambar 4.

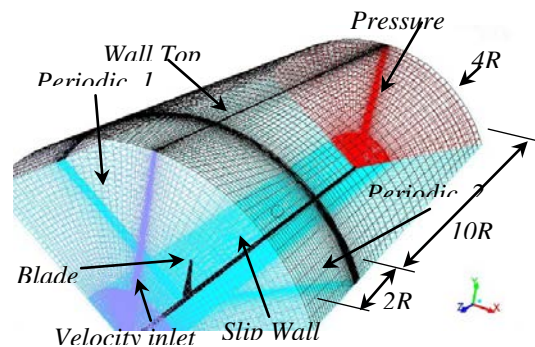


Gambar 3. Airfoil dari blade



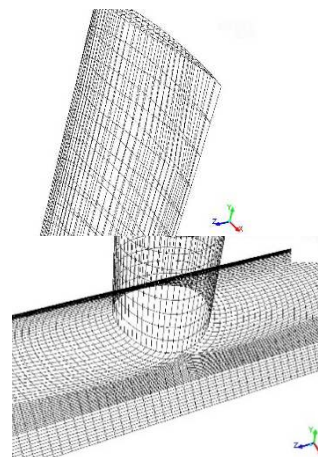
Gambar 4. Airfoil dari blade

Tahap pelaksanaan pertama selanjutnya adalah membuat domain komputasi. Model numerik yang digunakan adalah model dengan hanya 1/3 dari domain (Gambar 5) menggunakan asumsi periodisitas pada penampang antarmukanya dengan mendefinisikan sebagai *periodic* yang selanjutnya model numerik tersebut diputar 120° untuk solusi 1/3 domain dengan kondisi batas pada Gambar 5.



Gambar 5. Domain komputasi rotor tunggal

Penelitian ini menggunakan analisis numerik melalui CFD, dan hasil simulasi yang mendekati hasil eksperimen dari BT4 yaitu menggunakan model turbulensi $k-\epsilon$ dengan model *realizable* (Verdy A. K., dkk, 2016) dengan $C_{P, \max} = 0,453$ dimana lebih rendah 3,09%. Dimana pembuatan *meshing* menggunakan software *Gambit*, dengan tipe *mapping meshing hexahedral* (Gambar 6).



Gambar 6. Hex mesh pada tip dan hub blade

Untuk tahapan simulasi rotor tunggal, menggunakan software *FLUENT ANSYS*, dimana *solver* yang digunakan adalah *pressure-based* dengan formulasi kecepatan

absolute, skema solusi *pressure-velocity coupling* digunakan algoritma *coupled*. Sementara prosuder iterasi, metode solusi penyelesaian persamaan tekanan menggunakan *second order*, kemudian persamaan momentum dan turbulen menggunakan skema QUICK, dimana sesuai dengan tipe mesh yaitu *hexahedral* sehingga akurasi perhitungannya menjadi lebih baik. Untuk persamaan volume atur menggunakan persamaan kontinuitas dan persamaan Navier-Stokes yang diterjemahkan dalam bentuk rotasional, sehingga mempunyai keuntungan pada pembuatan simulasi dimana tidak membutuhkan *mesh* bergerak dalam memperhitungkan rotasi *blade* dengan *moving referensi frames* (MRF), dengan asumsi periodisitas pada penampang anatrmuka dengan mendefinisikan sebagai *linked face* untuk periodik (Verdy A. K., dkk, 2016).

Pada tahap validasi simulasi rotor tunggal didasari oleh performansi dari rotor blade dengan menampilkan parameter koefisien daya dengan menggunakan teori momentum, didapatkan perhitungan koefisien daya turbin (C_p) yang merupakan hasil pembagian antara daya mekanik yang dihasilkan rotor turbin (P_{out}) dengan daya total dalam aliran angin (P_{in}) untuk luas sapuan rotor yang didapatkan, Q diperoleh dari hasil simulasi. Analisa ini didapatkan dari persamaan sebagai berikut:

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{Q \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 A} \quad (1)$$

Tahap pelaksanaan yang berikutnya adalah simulasi dual rotor (CRWT), dalam tahapan ini mencakup tahapan desain dual rotor, desain domain komputasi dan simulasi dual rotor. Desain rotor untuk rotor depan tetap menggunakan desain rotor tunggal, kemudian untuk desain rotor tunggal divariasikan dengan format D_1/D_2 yaitu 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5 dan 2. Pada desain ini *solidity* konstan, kemudian jarak konstan yaitu 0.236 m. Variasi ukuran diameter antara rotor depan dan belakang dapat dilihat di Tabel 1. *Geometry blade* ditunjukkan pada Gambar 7, sebagai berikut.

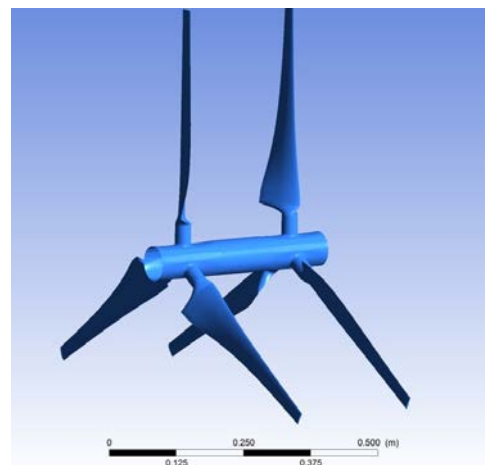
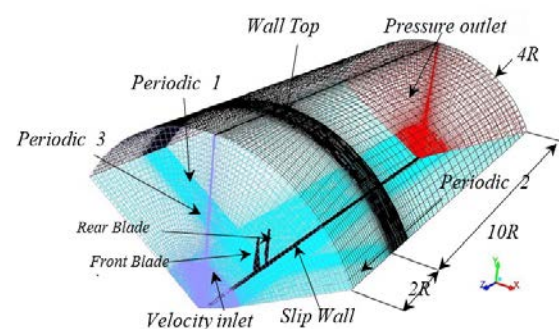
Tabel 1. Data parameter penelitian dual rotor

D_1 (mm)	D_2 (mm)	D_1/D_2	R_{hub} (mm)	R_{tip} (mm)	<i>Solidity</i>
0.944	1.888	0.50	0.130	0.944	0.091778
0.944	1.259	0.75	0.087	0.629	0.091778
0.944	0.944	1.00	0.065	0.472	0.091778

0.944	0.755	1.25	0.052	0.378	0.091778
0.944	0.629	1.50	0.043	0.315	0.091778
0.944	0.539	1.75	0.037	0.270	0.091778
0.944	0.472	2.00	0.033	0.236	0.091778

Untuk tahap desain domain komputasi dual rotor, menggunakan *geometry* yang sama dengan domain komputasi rotor tunggal namun dimodifikasi untuk penambahan periodik yang meliputi rotor belakang. Desain domain komputasi dapat dilihat pada Gambar 8.

Pada tahap simulasi dual rotor, solver yang digunakan tetap menggunakan tipe *mesh hexahedral* dengan *software Gambit* dan komposisi pengaturan solver yang sama dengan menggunakan *software FLUENT ANSYS* dengan settingan yang sama, namun ada penambahan modifikasi putaran kecepatan antara rotor depan dan rotor belakang agar didapatkan performa terbaik setiap variasi rasio diameter, ditunjukkan pada tabel 2.

Gambar 7. *Geometry Blade* Dual rotorGambar 8. *Domain* Komputasi Dual rotor

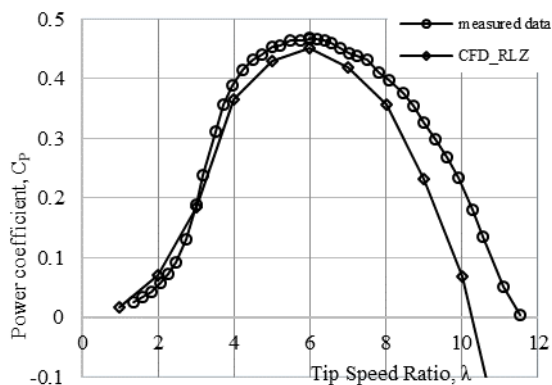
Tabel 2. Data rasio diameter (D) rotor terhadap rasio putaran ($n_1 = 728$ rpm)

D_2 (mm)	D_1/D_2	n_1 (rpm)	n_2 (rpm)	n_2/n_1
1.888	0.50	1213.3	728	0.6
1.259	0.75	1213.3	728	0.6
0.944	1.00	728	1213.3	0.6
0.755	1.25	728	873.6	1.2
0.629	1.50	728	873.6	1.2
0.539	1.75	728	873.6	1.2
0.472	2.00	728	873.6	1.2

Proses simulasi pada penelitian ini dijalankan secara paralel menggunakan Fluent Ansys 15.0.7 dan terpisah pada dua unit personal komputer dengan spesifikasi masing-masing adalah *processor Intel Core i3 4130CPU*, RAM 16GB, VGA NVidia GeForce GT 730 2GB dan *processor Intel Core i7 3770CPU*, RAM 24GB, VGA AMD Radeon HD 5700 2GB.

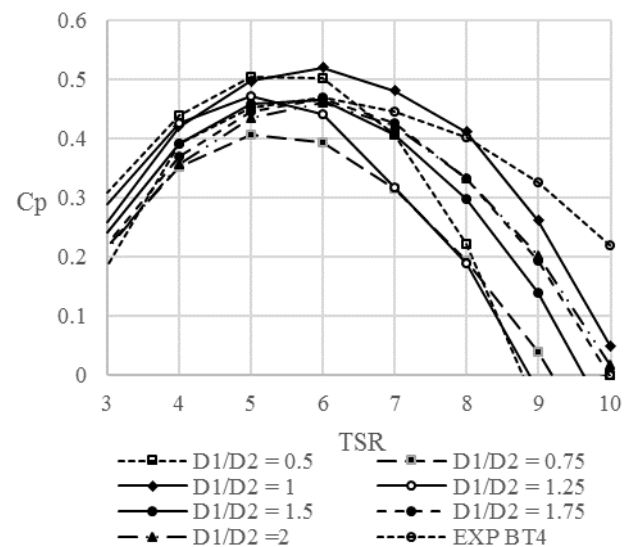
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan diawali dengan hasil validasi simulasi rotor tunggal dengan terhadap hasil eksperimen yang dilakukan oleh Bartl dan Sætran (2016) pada eksperimen *Blind Test 4* (BT4). Hasil simulasi yang dilakukan oleh Verdy A. K., dkk (2016), dengan parameter simulasi seperti kondisi batas, metode solution dan control solution dengan jumlah node mesh mencapai 1.3 juta menggunakan metode turbulent $k-\epsilon$ realizable menunjukkan hasil yang cukup mendekati mendekati hasil eksperimen yang dilakukan oleh Bartl dan Sætran (2016) pada eksperimen *Blind Test 4* (BT4). Hasil tersebut dapat dilihat pada grafik yang ditunjukkan pada Gambar 9.

Gambar 9. Hubungan koefisien daya dan *tip speed ratio* dengan model turbulent $k-\epsilon$ realizable, *measure data* dari *Blind Test 4*, Bartl dan Sætran (2016)

Hasil dari simulasi rotor tunggal tersebut menunjukkan bahwa koefisien daya maksimum yang diperoleh pada $TSR = 6$ dengan $C_{p, maks} = 0.453$ dimana lebih rendah 3.09% dari hasil eksperimen yang diperoleh Bartl dan Sætran (2016) pada eksperimen *Blind Test 4* (BT4). Hasil simulasi yang digunakan oleh Verdy A. K., dkk (2016) tersebut menjadi acuan dalam penelitian ini, dimana metode turbulent dan desain *meshing* tipe *hexahedral* dan desain domain komputasi yang menggunakan *periodic* yang dihubungkan dengan pengaturan *linked face*.

Dari hasil simulasi dual rotor, dapat dilihat pada Gambar 10, menunjukkan bahwa koefisien daya dual rotor total terbaik terjadi pada $TSR = 6$ di variasi rasio diameter $D_1/D_2 = 1$.

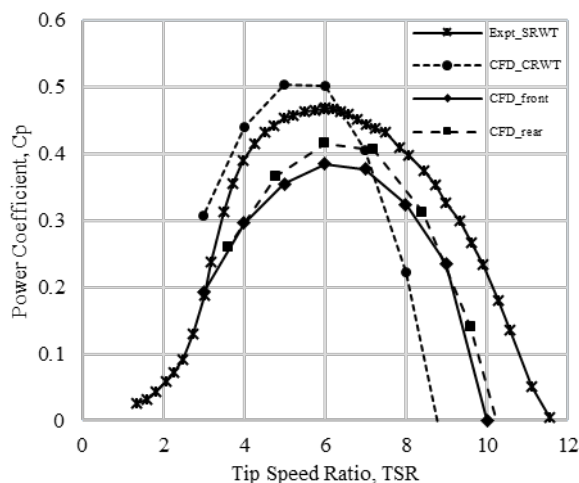


Gambar 10. Perbandingan koefisien daya masing-masing variasi rasio diameter

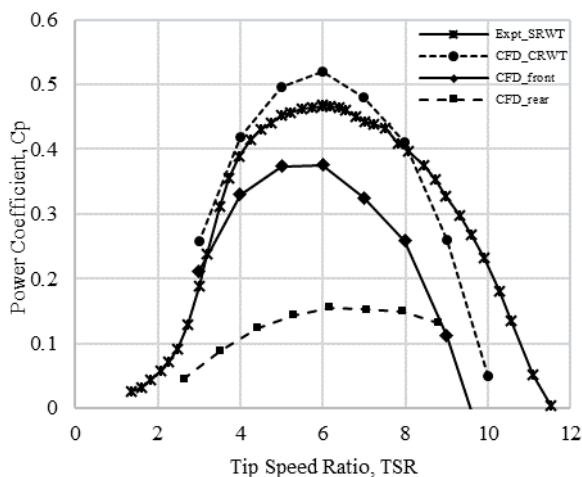
Dari Gambar 10 juga didapatkan bahwa hasil dari simulasi dual rotor memiliki koefisien daya lebih baik dari hasil eksperimen rotor tunggal yaitu terdapat pada variasi rasio diameter $D_1/D_2 = 0.5$ dan 1. Koefisien daya total maksimal terjadi pada $TSR = 6$, pada variasi rasio diameter $D_1/D_2 = 0.5$ didapatkan koefisien daya total sebesar 0.5018 dimana

mengalami kenaikan 7.21% dari koefisien daya rotor tunggal sedangkan pada variasi rasio diameter $D_1/D_2 = 1$ didapatkan koefisien daya sebesar 0.5198 dimana ada kenaikan 11.06% dari rotor tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa desain CRWT dapat digunakan secara maksimal dengan mengacu pada hasil koefisien daya total *counter-rotating wind turbine* lebih dari koefisien daya rotor tunggal yaitu pada variasi rasio diameter $D_1/D_2 = 0.5$ dan $D_1/D_2 = 1$.

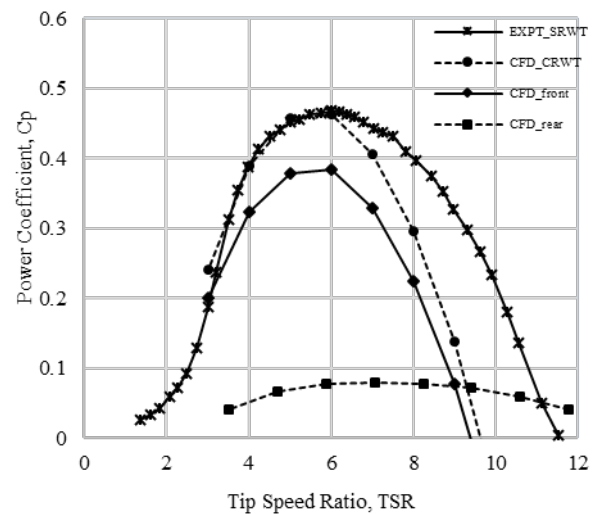
Dalam penelitian ini menitikberatkan pembahasan pengaruh dari variasi rasio diameter yaitu $D_1/D_2 < 1$, $D_1/D_2 = 1$ dan $D_1/D_2 > 1$ terhadap performa kinerja CRWT dimana ditentukan berdasarkan koefisien turbin. Oleh karena itu, perlu adanya perbandingan klasifikasi variasi rasio diameter terhadap koefisien daya.



Gambar 11. Perbandingan variasi rasio diameter (D_1/D_2) = 0.5 terhadap koefisien daya

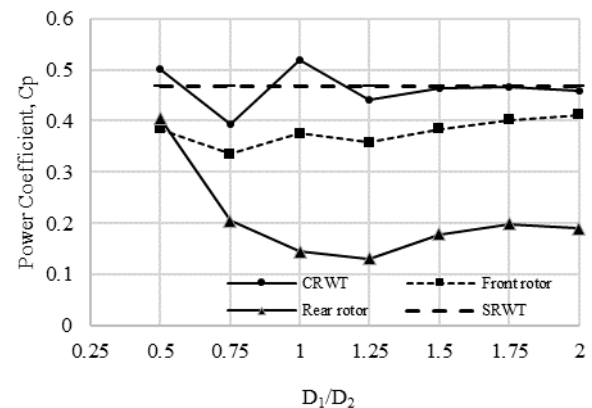


Gambar 12. Perbandingan variasi rasio diameter (D_1/D_2) = 1 terhadap koefisien daya

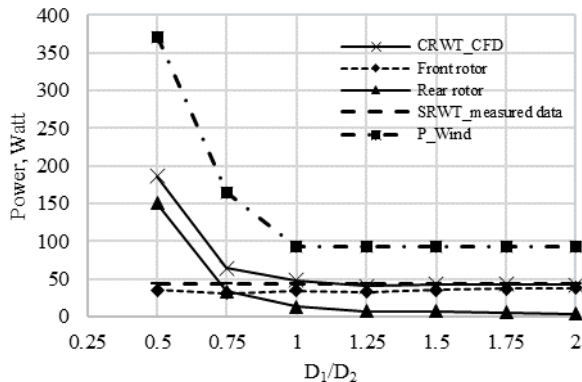


Gambar 13. Perbandingan variasi rasio diameter (D_1/D_2) = 1.5 terhadap koefisien daya

Dari Gambar 11 ditunjukkan perbandingan variasi diameter (D_1/D_2) = 0.5 terhadap koefisien daya, dimana $C_{p, \max} = 0.50380$ pada TSR 5. Nilai $C_{p, \max}$ ini menunjukkan bahwa peningkatan koefisiensi 11.32% lebih baik dari SRWT pada TSR yang sama. Pada Gambar 12 ditunjukkan perbandingan variasi diameter (D_1/D_2) = 1 terhadap koefisien daya, dimana $C_{p, \max} = 0.51976$ pada TSR 6, nilai $C_{p, \max}$ ini menunjukkan bahwa peningkatan koefisiensi 11.06% dari SRWT. Pada Gambar 13 ditunjukkan perbandingan variasi diameter (D_1/D_2) = 1.5 terhadap koefisien daya, dimana $C_{p, \max} = 0.46388$ pada TSR 6, nilai $C_{p, \max}$ ini menunjukkan bahwa adanya penurunan koefisiensi -0.88% dari SRWT.



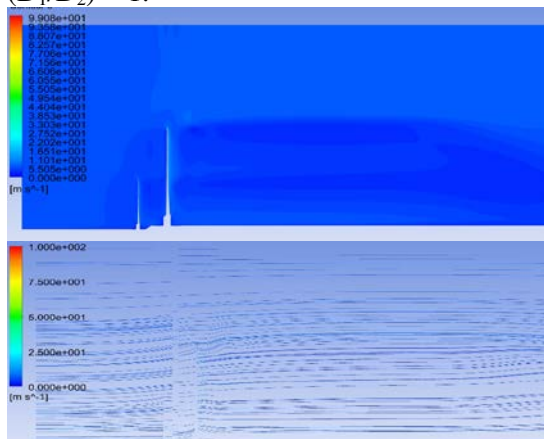
Gambar 14. Perbandingan koefisien daya turbin di setiap variasi rasio diameter pada TSR = 6



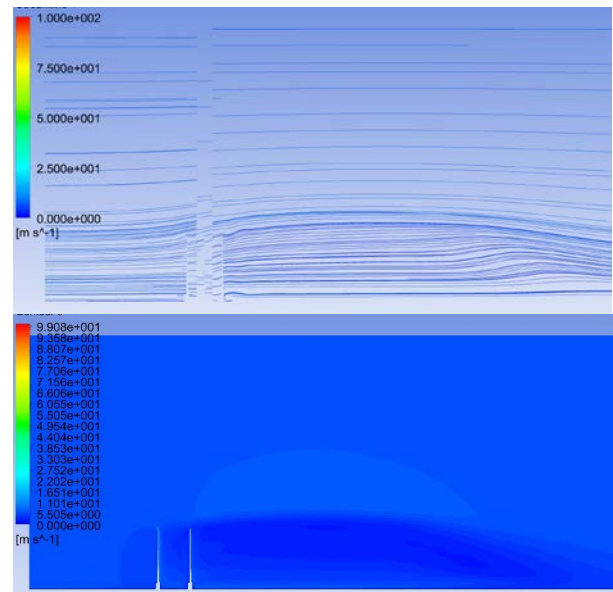
Gambar 15. Perbandingan daya output turbin di setiap variasi rasio diameter pada TSR = 6

Hasil dari penelitian ini adalah mencari koefisien daya turbin yang maksimal, dimana peningkatan koefisien daya turbin yang terjadi pada dual rotor dipengaruhi oleh peningkatan daya output. Dari hasil simulasi dual rotor, didapatkan hasil koefisien daya total turbin terbaik terdapat pada TSR = 6. Maka perlu ada perbandingan antara koefisien daya dan daya output di setiap variasi rasio diameter pada TSR = 6 dan akan ditunjukkan pada Gambar 14 dan Gambar 15.

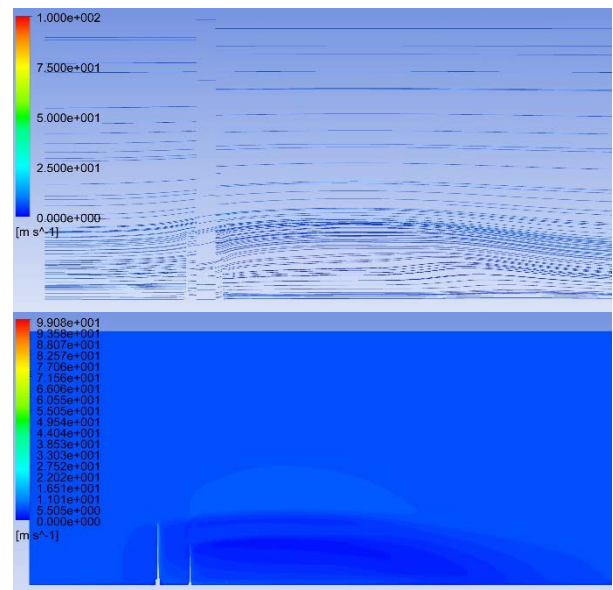
Dari Gambar 11 dan Gambar 12 menunjukkan perbandingan koefisien daya turbin dan daya output di setiap variasi rasio diameter pada TSR = 6, meliputi nilai pada CRWT, rotor depan (*front rotor*), rotor belakang (*rear rotor*) dan SRWT. Dimana untuk variasi rasio diameter (D_1/D_2) < 1 pada rotor belakang menunjukkan kinerja yang baik. Sementara untuk variasi rasio diameter (D_1/D_2) ≥ 1 , rotor depan menunjukkan kinerja yang baik. Secara menyeluruh, kinerja terbaik CRWT ditunjukkan pada rasio diameter (D_1/D_2) = 1.



Gambar 16. Aliran angin pada variasi diameter (D_1/D_2) = 0.5 pada TSR = 6



Gambar 17. Aliran angin pada variasi diameter (D_1/D_2) = 1 pada TSR = 6



Gambar 18. Aliran angin pada variasi diameter (D_1/D_2) = 1.5 pada TSR = 6

Dari simulasi yang telah dilakukan dalam penelitian ini dengan menggunakan *Fluent ANSYS* dapat dilihat visualisasi aliran dari angin. Dalam visualisasi tersebut dapat dicermati bagaimana aliran angin yang terjadi pada setiap klasifikasi variasi rasio diameter, visualisasi tersebut akan ditunjukkan pada Gambar 16, Gambar 17, dan Gambar 18.

Penurunan kecepatan setelah melewati rotor pertama pada Gambar 17 di mana (D_1/D_2) = 1, terlihat penurunan kecepatan lebih

dominan di daerah tip pada rotor belakang. Sementara pada Gambar 16 penurunan kecepatan angin dari ujung *tip* hingga setengah dari panjang *blade* rotor belakang dan Gambar 18, penurunan kecepatan dominan sepanjang *blade* pada rotor belakang.

Selain mengalami penurunan kecepatan angin, terjadi pula kenaikan kecepatan angin. Setelah melewati rotor belakang, terjadi kenaikan kecepatan aliran angin. Terlihat pada Gambar 18, terjadi kenaikan kecepatan aliran angin di ujung *tip* hingga setengah dari panjang *blade*.

Dari visualisasi aliran angin terlihat bahwa variasi diameter (D_1/D_2) = 1 memiliki hasil koefisiensi daya yang terbaik, dikarenakan penurunan kecepatan yang terjadi hanya terdapat pada ujung *tip* rotor belakang berbeda pada variasi diameter lainnya dimana penurunan kecepatan aliran angin terjadi separuh dari panjang maupun sepanjang rotor belakang.

SIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan yang didapatkan pada penelitian tentang analisa pengaruh variasi rasio diameter sebagai parameter kinerja aerodinamika CRWT adalah hasil dari simulasi dual rotor memiliki koefisien daya lebih baik dari hasil eksperimen rotor tunggal. Hasil tersebut diperoleh berdasarkan hasil simulasi pada variasi rasio diameter $D_1/D_2 = 0.5$ dan 1. Dimana koefisien daya total maksimal terjadi pada TSR = 6, pada variasi rasio diameter $D_1/D_2 = 0.5$ didapatkan koefisien daya total sebesar 0.5018 dimana mengalami kenaikan 7.21% dari koefisien daya rotor tunggal sedangkan pada variasi rasio diameter $D_1/D_2 = 1$ didapatkan koefisien daya sebesar 0.5198 dimana ada kenaikan 11.06% dari rotor tunggal. Hal ini menunjukkan bahwa desain CRWT dapat digunakan secara maksimal dengan mengacu pada hasil koefisien daya total *counter-rotating wind turbine* lebih dari koefisien daya rotor tunggal yaitu pada variasi rasio diameter $D_1/D_2 = 0.5$ dan $D_1/D_2 = 1$. Dari hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa koefisien daya dual rotor total terbaik terjadi pada variasi rasio diameter $D_1/D_2 = 1$.

Berdasarkan pada visualisasi aliran angin terlihat bahwa variasi diameter (D_1/D_2) = 1 memiliki hasil koefisiensi daya yang terbaik, dikarenakan penurunan kecepatan yang terjadi

hanya terdapat pada ujung *tip* rotor belakang berbeda pada variasi diameter lainnya dimana penurunan kecepatan aliran angin terjadi separuh dari panjang maupun sepanjang rotor belakang.

Dalam penelitian ini masih menggunakan *solidity* dan sudut *pitch* yang konstan, sehingga perlu adanya improvisasi desain *blade* dapat meningkatkan *performance* dari koefisien daya total dari CRWT. Hal tersebut menjadi saran dari peneliti untuk kelanjutan dari penelitian tentang *Counter-Rotating Wind Turbine*.

DAFTAR PUSTAKA

- Chantharasenawong C., Suwantragul B., Ruangwiset A., and C. P., "Axial Momentum Theory for Turbines with Co-axial Counter rotating Rotors," *Commemorative International Conference of the Occasion of the 4th Cycle Anniversary of KMUTT 11-13 December 2008, Bangkok, Thailand*.
- J. Bartl, and L. Sætran, 2016, Blind test comparison of the performance and wake flow between two in-line wind turbines exposed to different atmospheric inflow conditions, *Wind Energy Sci. Discuss.*, doi:10.5194/wes-2016-31, in review, 2016.
- Jung S. N., T.-S. No, and K. Ryu, 2005, "Aerodynamic kinerjance prediction of a 30 kW counter-rotating wind turbine system," *Renewable Energy*, vol. 30, no. 5, pp. 631–644.
- Kanemoto T. and Galal A. M. , 2006, "Development of Intelligent Wind Turbine Generator with Tandem Wind Rotors and Double Rotational Armatures (1st Report , Superior Operation of Tandem Wind Rotors)," *JSME International Journal*, Series B, vol. 49, no. 2, pp. 450–457.
- Koehuan, V. A., Riszal. A., Buana, S.W., Kamal. S., Sugiyono. 2016. *Komparasi Model Turbulen Simulasi CFD terhadap Performance dan Wake Rotor Turbin Angin Poros Horizontal*. Makalah disajikan dalam Seminar Nasional *Thermofluid*, Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada, 10 Nopember.
- Krogstad Per-Åge, Pål Egil Eriksen Blind test" calculations of the performance and wake development for a model wind

- turbine, *Renewable Energy* 50 (2013) 325-333.
- Kubo K, Yohei Hano, Hiromi Mitarai, Kiyotaka Hirano, Toshiaki Kanemoto, Ahmed Mohamed Galal, (2010). Intelligent wind turbine unit with tandem rotors (discussion of prototype performances in field tests), *Current Applied Physics* 10 (2010) S326–S331.
- Newman B. G., 1983, “Actuator-Disc Theory For Vertical Axis Wind Turbines,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 15, pp. 347–355.
- Shen W. Z. , V. A K. Zakkam, Sørensen J. N. , and K. Appa, 2007, “Analysis of Counter-Rotating Wind Turbines,” *The Science of Making Torque from Wind, Journal of Physics: Conference Series* 75, p. 012003.
- Ushiyama Izumi, Toshihiko Shimota and Yukihiro Miura, 1996, “An Experimental Study Of The Two-Staged Wind Turbines,” WREC (World Renewable Energy Congress